

潘艳喜, 周忠发, 李 坡, 等. 旅游洞穴空气环境时空变化特征及其影响因素——以贵州省绥阳大风洞为例[J]. 中国岩溶, 2016, 35 (4): 425—431.  
DOI: 10.11932/karst20160410

# 旅游洞穴空气环境时空变化特征及其影响因素

## ——以贵州省绥阳大风洞为例

潘艳喜<sup>1,2</sup>, 周忠发<sup>1,2</sup>, 李 坡<sup>3,4</sup>, 曹明达<sup>1,2</sup>, 张绍云<sup>1,2</sup>, 殷 超<sup>1,2</sup>, 张 结<sup>1,2</sup>

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵州 贵阳 550001; 2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵州 贵阳 550001;  
3. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550001;  
4. 贵州省喀斯特洞穴(旅游)资源开发利用工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550001)

**摘 要:**为探究绥阳大风洞空气环境时空变化的规律及其成因,沿洞道布设 10 个监测点,并对各点在垂直剖面上(洞道上、中、下部)的温度、湿度和 CO<sub>2</sub> 浓度进行为期 11 个月的监测,结果表明:(1)大风洞空气环境要素(CO<sub>2</sub>、温度、相对湿度)均呈现出明显的季节变化,大体上 CO<sub>2</sub>、温度和湿度表现为冬季低,夏季高的特点。(2)春、夏、秋季洞内外空气交换较弱,由洞口至洞内深处 CO<sub>2</sub> 浓度、湿度逐渐增加,温度逐渐减小,且越往洞内深处,空气交换减弱,各参数变化越稳定;冬季洞内外空气交换作用强,由洞口至洞穴深部,温度变化曲线表现为并无突变点,且洞穴 CO<sub>2</sub>、湿度的垂直变化加大。(3)垂直变化上,春、夏、秋季洞穴 CO<sub>2</sub> 浓度、相对湿度差异大,洞底部 CO<sub>2</sub> 浓度和相对湿度大多高于洞顶部,但越往洞穴深入,3 个环境参数的垂直差异均减小。  
**关键词:**洞穴空气环境;时空变化;影响因素;双河洞系统;大风洞  
**中图分类号:**P642.25 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-4810(2016)04-0425-07

### 0 引 言

洞穴空气环境主要由洞穴气候(温度、相对湿度)及洞穴空气中的化学成分等因子构成<sup>[1]</sup>。目前,关于旅游洞穴空气环境的研究主要集中在洞穴气候环境上<sup>[2-5]</sup>。而后者受自然环境的影响外,同时与洞穴旅游活动有密切的联系<sup>[6]</sup>。国内外的学者利用自动监测系统对洞穴环境因子进行连续监测<sup>[7]</sup>,以了解洞穴环境的变化特征及影响因素。国内主要对浙江瑶琳洞<sup>[8]</sup>、北京石花洞<sup>[9]</sup>、贵州织金洞<sup>[10]</sup>、河北临城白云洞<sup>[11]</sup>、重庆雪玉洞<sup>[12]</sup>、本溪水洞<sup>[13]</sup>和安徽蓬莱仙洞<sup>[14]</sup>等旅游洞穴开展洞穴环境监测,其他洞穴则研究较少,洞穴环境的基本资料较缺乏。随着旅游洞穴开发力度的加大,游客数量的增加,加之洞穴环境保

护和管理相对滞后,致使许多洞穴景观遭受不同程度的破坏<sup>[15-16]</sup>。因此,加强洞穴空气环境的研究是洞穴环境保护的基础。大风洞虽作为旅游洞穴近 20 多年,但由于缺乏洞穴环境监测和科学的管理,大风洞洞穴环境已发生明显的变化,如洞内沉积物发生风化、剥落、灯光植物大量滋生等。因而,有必要对大风洞洞穴环境进行研究,找出其环境变化规律与影响因素,为相关部门采取保护措施提供依据。我们对大风洞 10 个监测点(图 1)上、中、下部(垂直剖面)的 CO<sub>2</sub> 浓度、温度、相对湿度等空气环境指标进行为期近一年的监测和分析,以揭示洞穴空气环境特征及其时空变化规律,进一步探讨其影响因素,以期为洞穴旅游资源的保护和旅游活动的科学管理提供依据。

基金项目:国家自然科学基金地区项目“岩溶洞穴 CO<sub>2</sub> 迁移变化机制及对洞穴岩溶环境的影响研究”(41361081);贵州省科技计划“贵州省洞穴调查数据技术服务”(黔科合 G 字[2014]4004-2 号);贵州省重大应用基础研究项目“喀斯特石漠化生态修复及生态经济系统优化调控研究—岩土类型格局”(黔科合 JZ 字[2014]200201)  
第一作者简介:潘艳喜(1992-),女,硕士研究生,研究方向:喀斯特洞穴旅游。E-mail:963860439@qq.com。  
通讯作者:周忠发(1969-),男,教授,博士生导师,研究方向:喀斯特资源环境。E-mail:fa6897@163.com。  
收稿日期:2016-04-10

1 大风洞地质概况

大风洞(图 1)是双河洞洞穴系统的一级支洞。双河洞位于贵州省绥阳县温泉镇以西 12 km,目前为亚洲第二长洞(约 162 km),是一座多层洞穴系统。洞穴群在地质构造上位于扬子准地台的风冈 NNE 向构造变形区西侧的铜鼓坪背斜南东翼,地跨黄鱼江复背斜和土坪复向斜西缘,地质构造复杂<sup>[17]</sup>;地层属于黔北沉积区西部,自古生代以来,总体上属于浅海沉积环境,由于受不同方向区域构造应力作用,所形成的 NE、NW 及 SN 向褶皱断裂带,将洞区围成一个相对上升的三角形地块,岩层产状微向东倾,倾角 5°~7°,出露地层以中上寒武统娄山关组( $\epsilon_{2-3ls}$ )及下奥陶统桐梓组( $O_{1t}$ )的白云岩、灰质白云岩及夹燧石和泥质的白云岩为主<sup>[18-19]</sup>。因受多次间歇性的构

造抬升运动影响,洞区断层、节理较为发育,节理方向为 NS 和 NW,节理密度为 1.7~8 条/m。背斜两侧的下奥陶系砂页岩及碎屑夹层地势较高,形成地表分水岭,使洞区的碳酸盐岩地块成为一个相对独立的汇水单元,故洞区地下河较为发育。洞区属亚热带季风气候区,兼有亚热带山地季风气候的特点。1 月均温 4℃,7 月均温 22.5℃,年均温 15.5℃;年降水量 1 210 mm,大多集中于 5—10 月,且降水强度大;植被主要为亚热带常绿阔叶林。

大风洞 1993 年对外开放,洞口海拔 734 m,洞口高度 4.5 m、宽度平均 7.6 m,洞长 531 m。洞道水平起伏较小,洞高 6~10 m,洞道单一,且向南越来越宽。洞内发育众多的次生碳酸钙沉积景观,如形态各异的石笋、石钟乳、石瀑和 1 000 余种罕见的卷曲石花等。距洞口 500 多米处是旅游洞段的终点,与地下河相连<sup>[20]</sup>。

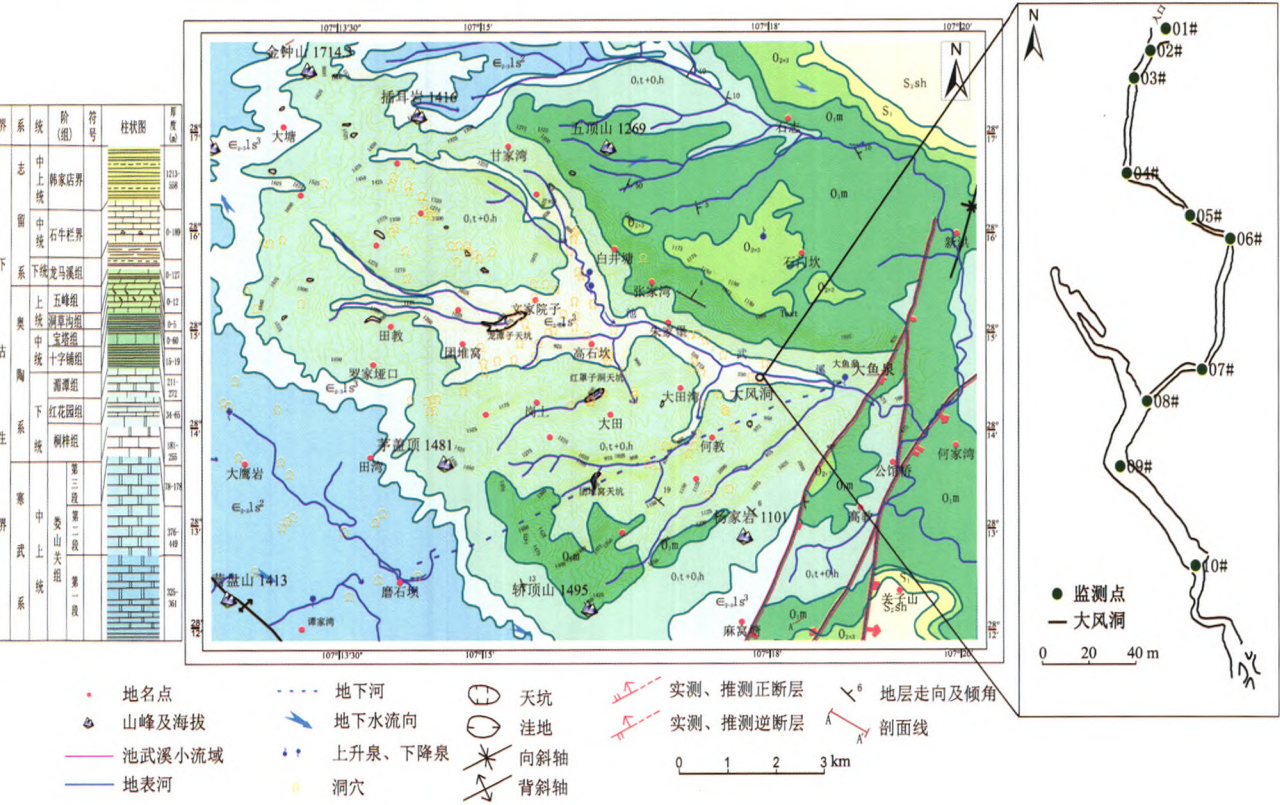


图 1 大风洞示意图  
Fig.1 Schematic diagram of the Dafeng cave

2 数据采集与处理方法

在大风洞入口至游览洞道终点设置了 10 个监测点(图 1)。2015 年 10 月至 2016 年 8 月期间每月对各监测点的上部(距洞顶板 0~2 m)、中部(距洞顶板 3~5 m)、下部(距洞顶板 6~8 m)的 CO<sub>2</sub> 浓度、温度

和相对湿度进行监测。洞穴空气 CO<sub>2</sub> 浓度的测定选用美国 Telaire—7001 型便携式红外 CO<sub>2</sub> 仪,仪器分辨率为 1 ppm,范围为 0~10 000 ppm,测量精度±50 ppm。实验前用标准气体(0 ppm)进行校准,操作时将仪器放置在距操作者 2 m 处以避免人为影响。使用美国 Kestrel—4500 型便携式气象站对洞穴内外



空气中的风速、温度、相对湿度、气压、海拔等进行实时监测,仪器分辨率分别为 0.1 m/s、0.1 ℃、0.1 %、0.1 mBar、1 m,测量精度分别是±3 %、±1.0 ℃、±3 %、±1.5 mBar、±15 m。另外,在监测前将 CO<sub>2</sub> 测试仪和风速仪捆绑于升缩杆上,一人举杆,另一人迅速记录。同时土壤 CO<sub>2</sub> 监测选用 LSBX 系列便携式检测警报仪,检测精度为≤300 ppm,线性误差为≤100 ppm,响应时间≤20 s,对洞穴上覆土壤监测点按不同深度进行测定。使用 Origin 8.6 等软件进行数据分析、处理。

3 结果与讨论

3.1 空气 CO<sub>2</sub> 浓度变化

洞穴 CO<sub>2</sub> 浓度是影响洞内空气环境质量的重要因素,其主要来源于土壤空气、洞穴水的脱气作用和游客的呼吸<sup>[21]</sup>。影响 CO<sub>2</sub> 浓度变化的因素除了其主要来源外,还有洞道类型(水洞或旱洞等)、洞道结构以及通风效应等<sup>[22]</sup>。

由图 2 可知,大风洞 CO<sub>2</sub> 浓度在洞口和洞内均具有明显的季节变化,表现为冬、春季节低(均值为 565 ppm),夏、秋季节高(均值为 994 ppm)。主要是由于夏季高温多雨,植物根系呼吸作用和土壤微生物活动强烈,土壤 CO<sub>2</sub> 浓度剧增(如表 1 所示,大风洞上覆土壤 CO<sub>2</sub> 浓度夏季明显高于冬季,且高于洞内空气)。高浓度的土壤 CO<sub>2</sub> 可溶解于土壤渗透水中,经由岩溶裂隙水或地下水等进入洞内,再经过滴水的脱气作用释放到洞穴空气中<sup>[23]</sup>;另外,土壤 CO<sub>2</sub> 还可能直接沿裂隙,通过“泵吸效应”进入洞内<sup>[4]</sup>。而冬季气候寒冷干燥,土壤中植物根系呼吸和微生物活动减弱,土壤 CO<sub>2</sub> 浓度降低,因此进入洞内空气中的 CO<sub>2</sub> 相对较少。此外,监测期间大风洞游客数量较少,日均游客量最高不超过 1 000 人(五一期间),最低只有几十人,因此游客对洞内 CO<sub>2</sub> 浓度的贡献较小。

表 1 冬季和夏季大风洞上覆土壤 CO<sub>2</sub> 浓度均值

Table 1 Mean value of soil CO<sub>2</sub> concentration in winter and summer in Dafeng cave

| 季节 | 土壤 CO <sub>2</sub> 浓度均值/ppm |        |        |        |
|----|-----------------------------|--------|--------|--------|
|    | DF1 #                       | DF2 #  | DF3 #  | DF4 #  |
| 夏季 | 9 423                       | 17 758 | 15 681 | 19 236 |
| 冬季 | 6 736                       | 12 355 | 1 879  | 12 356 |

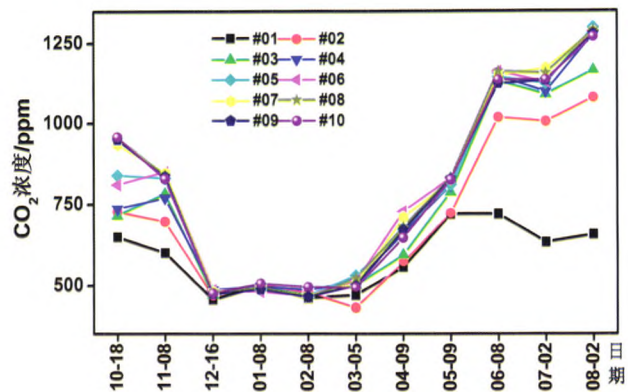


图 2 大风洞洞下部 CO<sub>2</sub> 浓度季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of CO<sub>2</sub> in the lower part of Dafeng cave

图 3 显示,CO<sub>2</sub> 浓度总体上由洞口向洞内逐渐升高,且渐趋稳定。如洞口附近(1 #)CO<sub>2</sub> 浓度平均值明显比洞穴深部(10 #)少 225 ppm,主要受洞口空气交换较强影响。冬季各监测点 CO<sub>2</sub> 浓度的变化波动较大,此外图 3 显示 12 月至次年 3 月,洞穴深部监测点 CO<sub>2</sub> 浓度变化幅度及垂直差异(洞底、中部和洞顶部)均较其他季节大,显示寒冷的冬季洞内外空气交换明显强于其他季节。大风洞是洞口向洞内略微倾斜的袋状洞穴,在寒冷的季节洞内较暖的空气上升至洞口,洞外空气补充入洞,形成洞内外空气交换,因此洞口与洞穴深部 CO<sub>2</sub> 浓度差异减小,但各监测点 CO<sub>2</sub> 浓度在垂直方向上波动较大;温暖的季节反之,洞内冷空气下沉,洞外较暖空气难以深入洞中,对流微弱,因此洞穴深部 CO<sub>2</sub> 逐渐升高且垂直方向上变化幅度减小。

垂直剖面上,洞道下部、中部和上部 CO<sub>2</sub> 浓度总体上在洞口附近波动较大,而至洞内深处则相对稳定,这也体现了通风效应的影响。总体上,下部 CO<sub>2</sub> 浓度要高于中上部,下部 CO<sub>2</sub> 浓度高于洞道上部的监测点大约占总数的 71%。

3.2 温度的时空变化

洞穴温度是洞穴气候环境最重要的指标之一,对洞穴物质和能量的迁移有着重要的影响<sup>[7]</sup>。有关资料显示,洞穴深处的温度与当地年平均温度相近。一般说,洞穴温度与洞穴的形态、洞口、深度、高程和纬度等因子密切相关<sup>[24]</sup>。

由图 4 可知,大风洞洞内外温度总体上呈现冬春季低,夏秋季高的季节变化特点,受洞外季节温度变化影响。洞口附近温度变化幅度(18.6 ℃)明显比洞内深处温度变化幅度(2.8 ℃)要大,与 CO<sub>2</sub> 浓度变化相似。



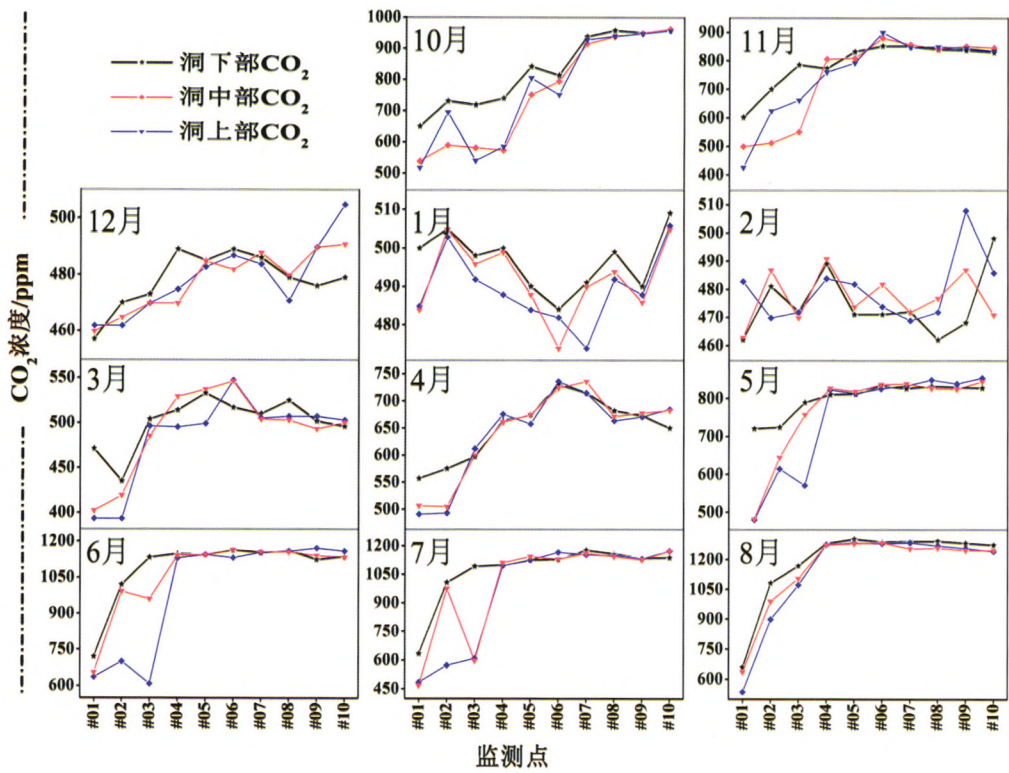


图3 大风洞 CO<sub>2</sub>垂直剖面分布图

Fig. 3 Distribution of CO<sub>2</sub> vertical profile in Dafeng cave

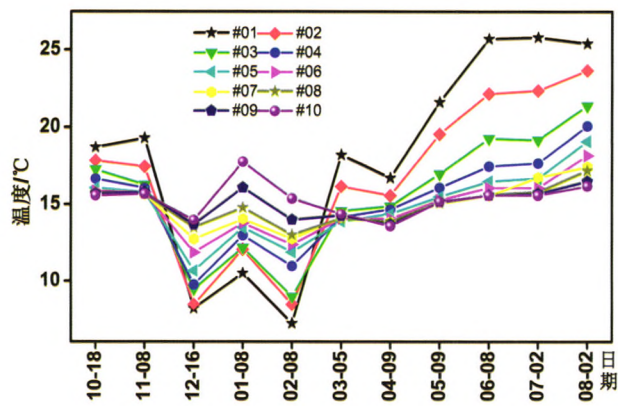


图4 大风洞洞下部温度季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of temperture in the lower part of Dafeng cave

图5显示,在水平方向上,10月、11月份由洞口向洞内温度逐渐降低,而至冬季(12、1、2月)温度则由洞口向洞内逐渐增加,春、夏季(3—8月)又由洞口向洞内逐渐降低。这主要是因洞内外温差的季节变化而导致的。从图5中可以看出10、11、3—8月份洞外温度高于洞内,由于洞内外温度差产生的气压差,使得洞内外之间的物质和能量发生迁移。10、11和3—8月的温度曲线在#06、#04点开始趋于平缓,基

本稳定在14~17℃之间,反映洞内外气流交换变弱。而冬季(12、1、2月)温度变化曲线没有突变点,且深入到洞内深部(#10点),说明洞内外空气交换比较顺畅,与对洞穴CO<sub>2</sub>浓度变化的分析一致。另外,冬季降水少,洞顶基岩裂隙处于开放状态,也促进了洞内外空间的交换。

垂直剖面上,春、夏、秋季洞口附近监测点总体上洞顶部温度要高于洞底部温度,与暖空气相对上升有关。至洞穴深处,由于洞外气流的影响减弱,洞内气温变化则主要受洞内滴水、水汽和岩石等的影响,温度的垂直变化差异不大。而冬季洞口垂直温度差异很小,相比之下,最深部的10号监测点垂直差异较大,同样表明冬季洞内外空气交换强。12月至次年2月的洞温变化曲线中,往洞穴内部,垂直温度呈显著的交替变化,即3条温度曲线(上、中、下部)交织在一起,显示冬季洞内外空气湍流交换的现象,这种交替变化在其他季节和月份也存在,但各监测点垂直差异会较小,或是越往洞穴深入,温度垂直差异越小,即洞穴深部的3条曲线几乎重叠在一起,表明这些月份洞内外空气交换强度较小,这与此前的分析也是一致的。

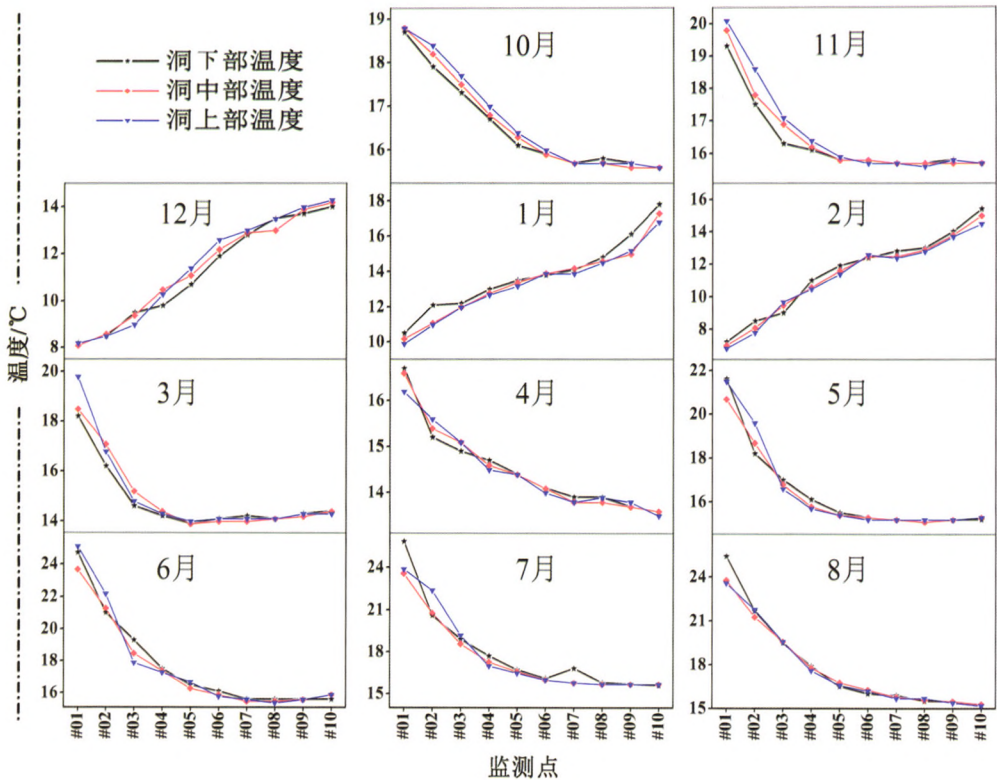


图 5 大风洞温度垂直剖面分布图

Fig. 5 Seasonal variation of temperture in Dafeng cave

### 3.3 相对湿度时空变化

洞穴湿度是洞穴内空气中水气压与饱和水气压的百分比,它也是影响洞内沉积景观的重要因子。洞穴湿度与季节、气候、天气和温度密切相关,也与洞穴中空气的流动有关<sup>[23]</sup>。另外游客数量和灯光照射等因素对洞内湿度有一定的影响<sup>[15]</sup>。

由图 6 可知,洞内外相对湿度均具有明显的季节变化,表现为冬季相对湿度低,春、夏季相对湿度较高。尤其是 2 月洞内外相对湿度达最低值为 60.3 %。10 月和 3—8 月相对湿度均超过 90 %,并且变化幅度相对较小,在 1.2 %~6.1 %之间,而 11 月至次年 2 月相对湿度变化基本在 55 %~90 %之间,变化幅度在 4.8 %~26.7 %之间,这样大幅度的变化与人为影响有关。在 11 月至次年 2 月,洞内因旅游需要,进行了部分施工,使洞内粉尘量增加,对洞内相对湿度有明显的影响。随着施工结束,洞内湿度变化开始逐渐稳定。推测冬季洞内相对湿度也因受空气交换加强影响而波动加大,这需要在以后补充监测加以证实。此外,洞内湿度还受降雨的影响(图 6)。

除冬季外,春、夏、秋季洞内的相对湿度由洞口向洞内,总体上是逐渐增加的,且越向洞内深处,相对湿

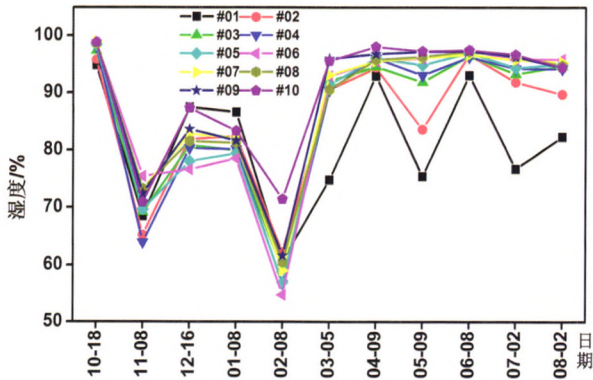


图 6 大风洞洞下部相对湿度季节变化

Fig. 6 Seasonal variation of relative humidity in the lower part of Dafeng cave

度越稳定(图 7),也印证了前文该 3 季洞穴深部空气交换较弱的分析。

垂直剖面上,洞口附近总体上洞上部相对湿度比洞底部要低,因为水汽主要来源于洞底地面或水面。而至洞内深部在垂直剖面上湿度变化曲线几乎重合,洞深部湿度变化几乎不变,尤其是 10 月和 3—8 月,变幅仅 0.7 %~5.4 %。



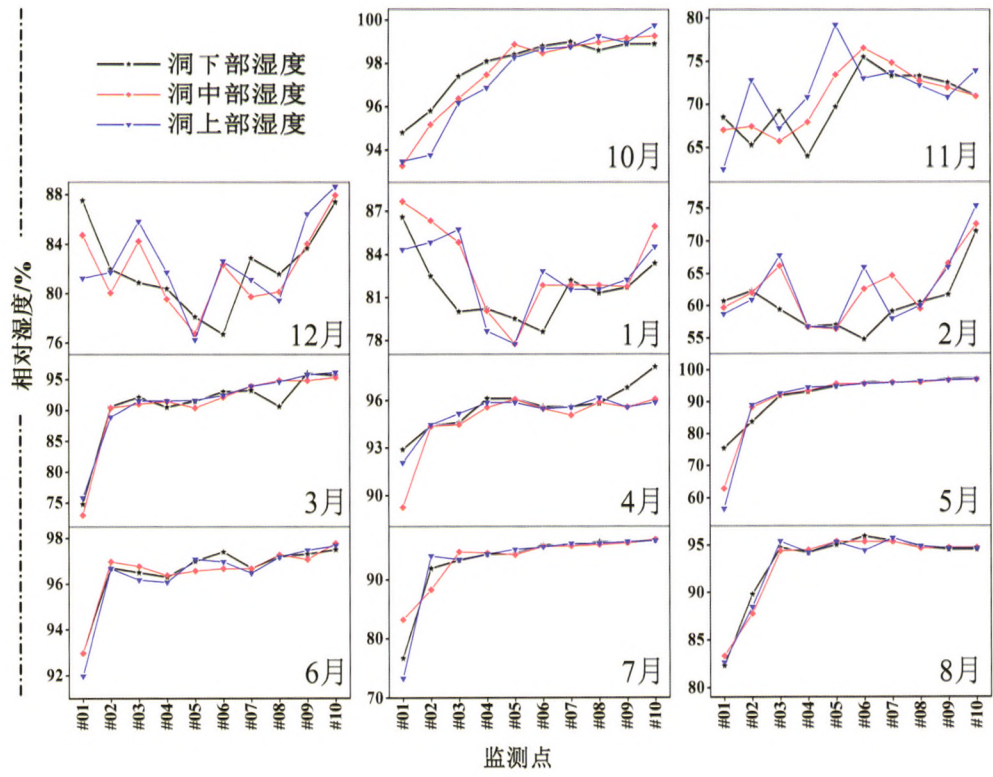


图 7 大风洞相对湿度垂直剖面分布

Fig. 7 Distribution of relative humidity vertical profile in Dafeng cave

4 结 论

(1)大风洞空气环境要素(CO<sub>2</sub>、温度、相对湿度)均呈现出明显的季节变化,大体上 CO<sub>2</sub>、温度和湿度表现为冬季低,夏季高的特点。

(2)受温度的季节变化和洞体形态影响,春、夏、秋季由洞口至洞内 CO<sub>2</sub> 浓度、湿度逐渐增加,温度逐渐减小,且越往洞内深处,通风效应越弱,其变化越稳定。而冬季由洞口至洞穴深部的温度变化曲线无突变点,CO<sub>2</sub> 浓度垂直变幅大,反映冬季洞内外气流交换较其他季节强。

(3)垂直变化上,春、夏、秋季洞穴 CO<sub>2</sub> 浓度、相对湿度差异大,洞下部 CO<sub>2</sub> 浓度和相对湿度大多高于洞上部,但越往洞穴深入,环境参数的垂直差异均逐渐减小,直至 3 条变化曲线几乎重合。

致 谢:感谢遵义市绥阳县双河洞地质公园管理处欧阳宏处长及大风洞管理处贺强总经理给予我们的帮助。

参考文献

[1] 袁道先,蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆:重庆出版社,1988:33.

[2] 朱德浩. 岩溶洞穴成因研究和实验研究综述[J]. 中国岩溶, 1993,12(3):285-291.

[3] 程星. 滴石形态组合及滴率条件[J]. 中国岩溶,1990,19(2):119-128.

[4] 童晓宁,周厚云,黄颖,等. 广东英德宝晶宫 CO<sub>2</sub> 浓度的时空变化特征[J]. 热带地理,2013,33(4):439-443.

[5] 章典. 贵州喀斯特洞穴的气象特征和气候分带研究[J]. 中国岩溶,1985,4(1-2):140-147.

[6] 周长春,王晓青,孙小银,等. 旅游洞穴环境变化监测分析及其影响因素研究:以山东沂源九天洞为例[J]. 旅游学刊,2009,24(2):81-86.

[7] A Bogli. Karst Hydrology and Physical Speleology[M]. Berlin: Springer,1978:32-43.

[8] 宋林华,杨京蓉,林钧枢,等. 浙江瑶林洞风化碳酸钙景观复生试验中 CO<sub>2</sub> 吸收动力学研究[J]. 中国岩溶,1999,18(2):200-206.

[9] 张蕾,赵淑艳,赵习方. 北京石花洞内 CO<sub>2</sub> 的监测与评价[J]. 中国岩溶,1997,16(4):325-331.

[10] 李坡,朱文孝. 贵州织金洞的环境监测与评价[C]. 北京:地震出版社,1994:131-737.

[11] 宋林华,韦小宁,梁福源. 河北临城白云洞洞穴旅游对洞穴 CO<sub>2</sub> 浓度及温度的影响[J]. 中国岩溶,2003,22(3):230-235.

[12] 王翔宇,蒲俊兵,沈立成,等. 重庆雪玉洞 CO<sub>2</sub> 浓度变化的自然与人为因素探讨[J]. 热带地理,2010,30(3):272-277.

[13] 蔡炳贵,沈凛梅,郑伟,等. 本溪水洞洞穴空气 CO<sub>2</sub> 浓度与温、湿度的空间分布和昼夜变化特征[J]. 中国岩溶,2009,28(4):348-354.

[14] 杜金娥,张光生,王宁. 蓬莱仙洞 CO<sub>2</sub> 浓度及温度的变化规律初探[J]. 中国农学通报,2008,24(3):395-400.

- [15] 杨晓霞,施俊庄,向旭,等. 浅议旅游洞穴灯光植物的危害及防治[J]. 中国岩溶, 2012,31(4):433-440.
- [16] 杨晓霞,向旭,袁道先. 喀斯特洞穴旅游研究综述[J]. 中国岩溶, 2007,26(4):367-377.
- [17] 刘平. 贵州绥阳双河洞国家地质公园洞穴基本特征及成因探讨[J]. 贵州地质, 2008,25(4):302-305.
- [18] 贺卫,李坡,车家骧. 乌议双河洞穴主要形成特征及演化[J]. 贵州科学, 2001,19(1):71-76.
- [19] 陈建庚,张英骏. 贵州绥阳双河洞系的发育与成因探讨[J]. 中国岩溶, 1994,13(3):247-255.
- [20] 李坡,贺卫,钱治,等. 双河洞地质公园研究[M]. 贵阳:贵州人民出版社, 2008:84.
- [21] 张蔷,赵淑艳,赵习方. 北京石花洞内 CO<sub>2</sub> 的监测与评价[J]. 中国岩溶, 1997,16(4):325-331.
- [22] 王晓青,周长春,孙小银,等. 山东沂源九天洞洞穴环境变化监测分析[J]. 2008,27(1):91-96.
- [23] Baldini J U L, Baldini L M, McDermott F, et al. Carbon dioxide sources, sinks, and spatial variability in shallow temperate zone caves: Evidence from Ballynamindra Cave, Ireland[J]. Journal of Cave and Karst Studies, 2006,68(1):4-11.
- [24] 罗时琴,易武英,李坡. 织金洞洞穴环境监测及其影响因素分析[J]. 贵州科学, 2014,32(6):92-96.

## Characteristics of spatial temporal variation of air environment in tourism cave and its cause analysis: A case study of the Dafeng cave in Suiyang county, Guizhou Province

PAN Yan-xi<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhong-fa<sup>1,2</sup>, LI Po<sup>3,4</sup>, CAO Ming-da<sup>1,2</sup>, ZHANG Shao-yun<sup>1,2</sup>,  
YIN Chao<sup>1,2</sup>, ZHANG Jie<sup>1,2</sup>

(1. School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China;

2. The State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550001, China;

3. State Engineering Technology Center of Karst Rock Desertification Rehabilitation, Guiyang, Guizhou 550001, China;

4. Guizhou Engineering and Technology Research Center for Development & Utilization of Cave Resources, Guiyang, Guizhou 550001, China)

**Abstract** This study is to explore the fact and causes of the spatial and temporal variation of air environment in the Dafeng cave. 10 monitoring points were set up along the horizontal tunnel of Dafeng cave; and CO<sub>2</sub> concentration, temperature and relative humidity of each monitoring point had been continuously monitored for a period of 11 months (from October 2015 to August 2016). Through the analysis of these data gained from the cave, its air environment variation can be summarized as follows, (1) The air environment elements (i. e. CO<sub>2</sub>, temperature, relative humidity) of the tunnel show an obvious seasonal variation. In general, their values are low in winter and high in summer; (2) Due to weak air exchange with the external in the seasons of spring, summer and autumn, the CO<sub>2</sub> concentration and humidity gradually increase to the deep in the cave, while the temperature gradually decreases, and all of which stabilize at a certain depth of the cave tunnel owing to very limited cave air exchange with the outside. In winter time, the temperature curve does not indicate the abrupt change, but the CO<sub>2</sub> content and humidity fluctuate much in vertical direction from the roof to the bottom; (3) Vertically (from the bottom to the cave roof), the values of CO<sub>2</sub> concentration and humidity are different and they are higher at the bottom than those of the cave roof. To the further deep cave these three environmental elements get stabilized.

**Key words** cave air environment, temporal and spatial variation, influencing factors, Shuanghe cave system, Dafeng cave

(编辑 吴华英)